

**Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Šumperku .....

.....

Podpis

Prohlašuji, že

- jsem byla seznámena s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Šumperku .....

.....

Lucie Černušková

Čajkovského 30, Šumperk, 787 01

### **Anotace**

ČERNUŠKOVÁ, L. Vliv zaoblení řezné hrany nástroje při obrábění superslitin. Ostrava: katedra obrábění a montáže, Fakulta strojní VŠB-TUO, 2009, 43 s. Bakalářská práce, vedoucí Vrba, V.

Bakalářská práce je zaměřena na obrábění těžko obrobitelných materiálů z hlediska řezné geometrie nástroje a jejího vlivu na průběh obráběcího procesu. Zabývá se rozdělením superslitin, jejich obecnou charakteristikou a obrobitelností. Popisuje nejnovější trendy a poznatky při obrábění slitin titanu a podává možná řešení pro jejich lepší obrábění z hlediska jak vhodné úpravy nástroje, tak řezných podmínek.

Praktická část bakalářské práce zkoumá vliv zaoblení řezné hrany destičky ze slinutého karbidu na její opotřebení při obrábění slitiny titanu Ti-6Al-4V. Získané poznatky jsou aplikovány do běžné výroby testované destičky.

### **Anotation**

ČERNUŠKOVÁ, L. Influence of cutting edge radius at super alloys machining. Ostrava: Department of Working and Assembly, Faculty of Mechanical Engineering VŠB-TUO, 2009, 43 p. Bachelor thesis, head Vrba, V.

Thesis is focused on machining of hard to machine materials in term of insert geometry and its influence to cutting process. Consider super-alloys groups, their properties and machinability. Gives information about latest trends and knowledge regarding machining of titanium alloys and comes with improvements of cutting geometry and cutting conditions for effective machining process.

Practical part of the thesis examines influence of cutting edge radius of cemented carbide insert to its wear at machining titanium alloy Ti-6Al-4V. Obtained data are used for production of testing insert in production work.

## Obsah

Seznam použitého značení .....	7
Úvod .....	8
1 OBECNÁ CHARAKTERISTIKA DANÉHO PROBLÉMU .....	9
2 OBRÁBĚNÍ SUPERSLITIN .....	11
2.1 Historie superslitin .....	11
2.2 Hlavní charakteristika superslitin .....	11
2.3 Vliv vlastností superslitin na jejich obrábění .....	12
2.4 Titan a slitiny titanu .....	14
2.4.1 Čistý titan .....	15
2.4.2 Rozdělení slitin titanu .....	16
2.4.3 Tepelné zpracování slitin titanu .....	17
2.4.4 Slitina titani Ti-6Al-4V .....	17
2.4.5 Obrábění slitin titanu .....	18
2.4.5.1 Problémy při obrábění slitin titanu .....	19
2.4.5.2 Řezný materiál pro obrábění slitin titanu .....	20
2.4.5.3 Vhodná strategie frézování .....	22
2.4.5.4 Procesní kapaliny .....	22
2.4.5.5 Obrábění předeřátého titanu .....	23
2.4.6 Použití slitin titanu .....	23
2.4.7 Směr vývoje slitin titanu .....	24
2.5 Použití superslitin .....	24
3 NÁVRH VHODNÉ ÚPRAVY NÁSTROJE .....	26
3.1 Geometrie nástroje .....	26
3.1.1 Vliv zaoblení řezné hrany na opotřebené břitu .....	28
3.1.2 Měření zaoblení řezné hrany .....	30
4 DISKUZE EXPERIMENTÁLNÍCH PRACÍ .....	31
4.1 Testované destičky .....	31
4.1.1 Materiál testovaných destiček .....	33
4.2 Obráběný materiál .....	33
4.3 Obráběcí stroj .....	33
4.4 Průběh zkoušek .....	34
4.5 Výsledky zkoušek .....	35
4.6 Vyhodnocení získaných výsledků .....	37
5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ .....	38
5.1 Řezné podmínky .....	38
5.2 Produktivita testované destičky .....	38
Závěr .....	41
Poděkování .....	42
Použitá literatura .....	43

## Seznam použitého značení

Symbol	Jednotka	Význam
A5	[%]	Tažnost
$a_e$	[mm]	Šířka řezu
$a_p$	[mm]	Šířka záběru ostří
D	[mm]	Průměr frézy
E	[MPa]	Modul pružnosti v tahu
f	[mm.min <sup>-1</sup> ]	Posuv
$f_z$	[mm.zub]	Posuv na zub
$H_m$	[mm]	Jmenovitá tloušťka třísky
HRB, HRC	[-]	Tvrdost podle Rockwella
n	[min <sup>-1</sup> ]	Otáčky frézy
Q	[mm <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> ]	Objem odebraného materiálu
$R_e$	[Mpa]	Mez kluzu
$R_m$	[Mpa]	Mez pevnosti
T	[min]	Trvanlivost
$v_c$	[m.min <sup>-1</sup> ]	Řezná rychlost
z	[-]	Počet zubů frézy
$\alpha, \beta, \alpha\beta$	[-]	Fáze titanu
$\alpha_0$	[°]	Úhel hřbetu
$\gamma_0$	[°]	Úhel čela
$\Phi$	[°]	Úhel střižné roviny

## Úvod

Výzkum a vývoj v oblasti řezných nástrojů patří mezi nejrychleji se rozvíjející části strojírenské technologie. Cílem se stalo zlepšení jakosti a efektivnosti obrábění společně se snížením výrobních nákladů na celý obráběcí proces. Nejen rostoucí požadavky na přesnost a kvalitu povrchu funkčních částí vyrobených součástí, ale i vývoj nových a přizpůsobování již stávajících materiálů obrobku, nutí výrobce ke zdokonalování svých řezných nástrojů, včetně nástrojového materiálu. Snižování nákladů na jejich výrobu už je jen nevyhnutelným důsledkem vyplývajícím z konkurenčního boje na trhu.

Stále se zvyšující nároky na mechanické vlastnosti obráběných materiálů, které však obvykle vedou ke zhoršení jejich obrobitelnosti, se tak staly do určité míry jakýmsi hnacím motorem pro všechna výzkumná pracoviště zabývající se problematikou řezných nástrojů. Důsledkem toho je současný široký sortiment řezných materiálů pro řezné nástroje s velkým záběrem jejich použití pro uspokojení náročných požadavků na dokonalé obrobení jakéhokoliv materiálu. Děje se tak především cestou zdokonalování již vyvinutých materiálů pro řezné nástroje, ale nejen to. Pro lepší obrobitelnost materiálů hraje mimo jiné velmi důležitou roli také geometrie nástroje a použití vhodných řezných podmínek a to jak s ohledem na kvalitu obrobené plochy, tak na trvanlivost řezného nástroje.

Superslitiny jako těžko obrobitelné materiály, ke kterým bezesporu patří, jsou dnes pro výrobu různých součástí používány stále častěji. Díky vynikajícím vlastnostem těchto super materiálů, mezi které patří především vysoká pevnost a s tím spojená odolnost proti otěru, se tak požadavky kladené na řezný nástroj stávají nemalé. Další jejich vlastností, která poměrně výrazně komplikuje jejich obrábění, je nízká tepelná vodivost. Nástroj tak musí odolávat nejen vysokým napětím, ale i velmi vysokým teplotám, které v oblasti řezu vznikají.

Na jedné straně se nám tedy ocitají stále dokonalejší materiály obrobků, na straně druhé jejich obtížnější obrobitelnost. Vývoj nástrojů jde proto nevyhnutelně ruku v ruce s materiálovým vývojem obrobků. Toto všechno sebou přináší v oblasti obrábění neustálou výzvu pro výzkumníky celého světa.

## 1 OBECNÁ CHARAKTERISTIKA DANÉHO PROBLÉMU

Obrábění superslitin patří mezi významné oblasti strojírenství, které je stále velkou výzvou pro všechny výrobce obráběcích nástrojů. Mezi velmi často používané slitiny se řadí i slitina titanu Ti-6Al-4V. S rostoucí poptávkou po součástech z toho materiálu, rostou i požadavky na obráběcí nástroj. Snižování nákladů na obrábění a požadavky na stále vyšší kvalitu obrobené součásti jsou pro výrobce nástrojů základními vstupními hodnotami.

Firma Seco Tools AB patří mezi přední výrobce nástrojů na světě. Zabývá se především výrobou nástrojů pro soustružení, frézování, vrtání a výrobou upínačů. Samotný vývoj nástrojů je zaměřen i na nástroje pro obrábění slitin titanu. Vzhledem k všeobecným požadavkům na nástroj při obrábění slitin titanu bylo nezbytné ověřit funkčnost a trvanlivost destičky s různým zaoblením řezné hrany. Výsledky těchto testů jsou následně uplatněny v sériové výrobě.

Samotná společnost s názvem Seco Tools AB v podobě, kterou známe dnes, funguje od roku 1974. Její historie ovšem sahá až do roku 1931, kdy firma, tehdy ještě pod názvem Fagersta AB, poprvé začíná obrábět nástrojem ze slinutého karbidu. Slovo „Seco“ se v názvu společnosti objevilo poprvé až v roce 1936 a to podle latinského „já obrábím“. Hlavní sídlo firmy je ve středu Švédska, v malém městě jménem Fagersta. Dalšími sídly společnosti ve Švédsku jsou Arboga, Ludvika, Norrköping a Norberg.



*Obr. 1.1 Seco Tools AB, Fagersta*

Největší podíl firmy vlastní společnost Sandvik AB a to sice 62 % kapitálu a 89,5 % podílu v rozhodování. Společnost Seco Tools AB má celkem pět tisíc zaměstnanců a zastoupení ve více než 60 zemích světa. Její roční obrat činí 6,5 miliardy švédských korun. Výroba destiček probíhá ve Švédsku, České republice (Firma Pramet Tools) a Indii. Nástroje se vyrábí ve Švédsku, USA, Francii a Indii. Distribuční centra jsou potom v Belgii, USA a Singapuru s doručením až 97 % zásilek včas. Podíl na světovém trhu je v soustružení 35 %, frézování 25 % a vrtání 20 %. Největšími konkurenty jsou společnosti Sandvik, Iscar a Kennametal.



## 2 OBRÁBĚNÍ SUPERSLITIN

### 2.1 Historie superslitin

Potřeba konstruktérů po pevnějších a korozi odolnějších materiálech pro využití za vysokých teplot byla již dlouhodobá. Nerezové oceli vyvinuté a aplikované na začátku 20. století sloužili jako východisko pro uspokojení těchto požadavků vysokoteplotního inženýrství. Jak se ovšem brzy ukázalo, toto východisko bylo jen dočasné, neboť pevnostní vlastnosti těchto materiálů velmi omezovaly možnosti jejich využití. Na stále se zvyšující potřeby konstruktérů celého světa tak zareagovali metalurgické společnosti, kterým se podařilo vytvořit něco, co mohlo být označeno jako „super-slitiny“. Netrvalo příliš dlouho, co byla odstraněna pomlčka mezi těmito dvěma slovy a vylepšené slitiny železa se tak staly známé jako superslitiny. Souběžně s propuknutím druhé světové války to byla plynová turbína, která se stala hlavním hnacím motorem pro přizpůsobování stávajících a vynalézání nových slitin. I přesto, že patenty na přísady hliníku a titanu do tzv. nichromů (slitina niklu a chromu vyvinutá v desátých létech 20. století) byly vydané již ve dvacátých létech minulého století, superslitinový průmysl jako takový se vyvinul až přizpůsobováním slitiny kobaltu v té době používané ve stomatologii. Přizpůsobování této slitiny mělo uspokojit požadavky vysokoteplotní pevnosti leteckých motorů a tak započal „závod“ ve vytváření nadřazených slitin kovů dostupných pro neukojitelnou touhu konstruktérů po stále se zvyšující pevnosti materiálů při vyšších teplotách, který pokračuje vlastně dodnes. [1]

### 2.2 Hlavní charakteristika superslitin

Jedná se o slitiny na bázi prvků skupiny VIII B v periodické tabulce, které jsou využívány pro aplikace s teplotami pohybujícími se nad 540 °C [1]. Společným rysem superslitin jsou dlouhodobá pevnost, chemická a fyzikální stálost povrchu a vynikající odolnost proti korozi a oxidaci, to vše při poměrně velkém tepelném a mechanickém namáhání, kterému jsou v provozních podmínkách neustále vystavovány.

Tyto slitiny jsou různou kombinací především železa, niklu, kobaltu a chromu, s malým množstvím wolframu, molybdenu, tantalu, rhenia, niobu, titanu a hliníku. [1] Při dosahování požadovaných vlastností superslitin se klade důraz především na vzájemnou spolupráci mezi těmito přídatnými prvky a celkovým zpracováním, jehož jednotlivé kroky jsou pro dosažení optimálních vlastností klíčové. Vše musí být ve vzájemné spolupráci.

Rozlišujeme tři hlavní skupiny superslitin: slitiny na bázi niklu, slitiny na bázi železo-niklu a slitiny na bázi kobaltu. [1] Z důvodu vzniku vysokých teplot a napětí v průběhu obrábění se superslitiny řadí mezi těžkoobrobitelné materiály. Díky svým jedinečným vlastnostem je jejich obrábění stále velkou výzvou pro všechny výzkumníky v obrábění.

### 2.3 Vliv vlastností superslitin na jejich obrábění

Typické vlastnosti superslitin: [2]

- Austenitická struktura podporuje mechanické zpevňování
- Zachovávají si vysokou pevnost i za zvýšených teplot
- Reaktivní s nástrojovými materiály za atmosférických podmínek
- Tendence k vzniku nárůstku a mikronavařování na čele
- Obsahují tvrdé abrazivní částice karbidů
- Obecně nízká tepelná vodivost

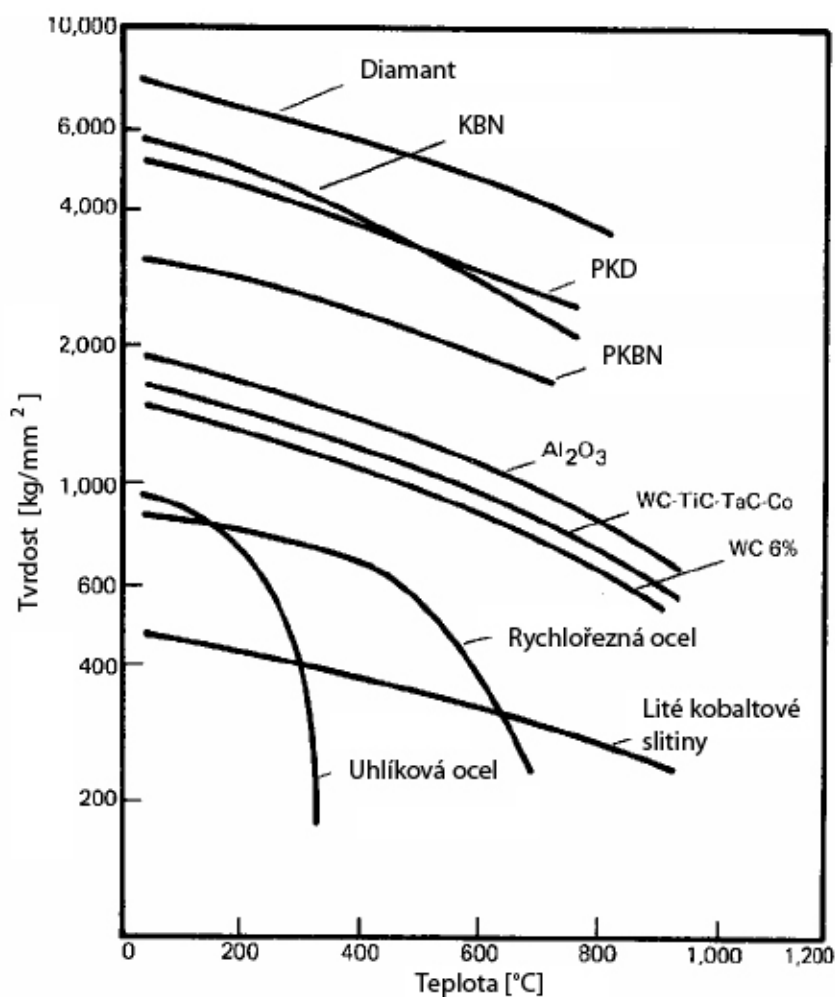
Tyto vlastnosti způsobují rychlé opotřebení na hřbetě nástroje, výmol na čele a vytrhávání materiálu na špičce nástroje. Vlastnosti superslitin za zvýšených teplot mají nepříznivý vliv na jejich obrobitelnost. Nárůst pevnosti za tepla je dělá tvrdšími a stabilnějšími při obráběcích teplotách, což má za následek velké síly na řeznou hranu. Tento jev podporuje vytrhávání materiálu na břitu a celkově břit deformuje. Nízká tepelná vodivost těchto velmi pevných materiálů podporuje vznik vysokých teplot v oblasti řezu. Vysoká pevnost za tepla, houževnatost a tvárnost značně zhoršují utváření třísky. Vysoké zpevňování superslitin v průběhu obrábění ovlivňují vlastnosti utvářeného povrchu. Vzniklý povrch je tvrdý a podporuje opotřebení nástroje, rovněž má za následek ztížení dodržení výrobních tolerancí a celkově špatnou homogenitu obrobku. [2]

*Tab. 2.1 Problémy při obrábění v závislosti na způsobu výroby superslitin [2]*

Druh výroby	Charakteristika	Problémy při obrábění
Odlévání	Vysoká mez tečení, houževnaté	Problémy s utvářením třísky
Kování	Vyšší pevnost, lepší odolnost proti únavě, vyšší lomová houževnatost	Slitiny jsou více abrazivní, velký sklon k deformaci nástroje
Prášková metalurgie	Více komplikované slitiny	Extrémně špatná obrobitelnost, velice abrazivní

Tvrdost většiny superslitin narůstá po tepelném zpracování. Povrch obrobené součásti má nežádoucí vlastnosti a je hůře obrobitelný. Součást se obvykle obrábí na rozměry blízké konečným, následuje zušlechťování, aby se dosáhlo homogenity obráběné součásti, a poté se obrobí zbytek na finální rozměry. Výsledkem je součást s vhodnými vlastnostmi povrchu a bez deformací vzniklých tepelným zpracováním. [2]

Pozitivní úhel čela je doporučován pro operace polohrubování a dokončování. Pozitivní geometrie minimalizuje zpevňování obrobeného povrchu tím, že se tříska odděluje s potencionálně nejmenším sklonem k vytváření nárůstku. Velmi ostrá geometrie je rovněž vhodnou prevencí proti vzniku nárůstku a má vliv na kvalitu obrobeného povrchu. Tupé nebo špatně nabroušené řezné hrany navyšují řezné síly, podporují vznik nárůstku, vznik trhlin a výskyt deformací na obrobku. Vzhledem k tomu, že ostrá řezná geometrie je křehká a má sklon k vytrhávání, je vhodné pro hrubovací operace použít přiměřené zaoblení hrany. Ostré řezné hrany jsou vhodné pro dokončovací operace. [2]



Obr. 2.1 Průběh tvrdosti za tepla u nástrojových materiálů [2]

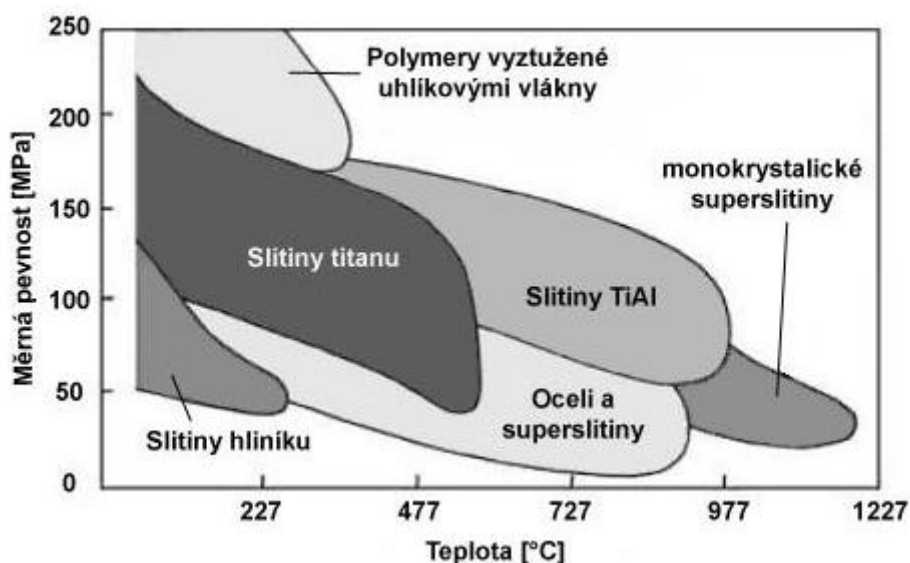
Řezné materiály se často setkávají s extrémním tepelným a mechanickým zatížením v oblasti řezu. Tohle obvykle vede k plastickým deformacím a zrychlenému opotřebení nástroje. Hlavním požadavkem na nástroje je tedy stálá pevnost za zvýšených teplot. Většina nástrojových materiálů tento požadavek nesplňuje, jelikož za vysokých teplot dochází k jejich měknutí následované zrychleným opotřebením. Pro obrábění superslitin je vhodné použít povlakované slinuté karbidy, keramiku, KBN/PKBN a PKD. Nicméně není vhodné použít keramiku nebo KBN/PKBN při obrábění slitin titanu vzhledem k jejich reaktivitě s titanem, která má vliv na trvanlivost nástroje. [2]

Tab. 2.2 Body měknutí vybraných nástrojových materiálů [2]

Nástrojový materiál	Bod měknutí [°C]
Rychlořezná ocel	600
Slinuté karbidy (WC)	1100
Keramika ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	1400
Kubický nitrid boru (KBN)	1500
Diamant	1500

## 2.4 Titan a slitiny titanu

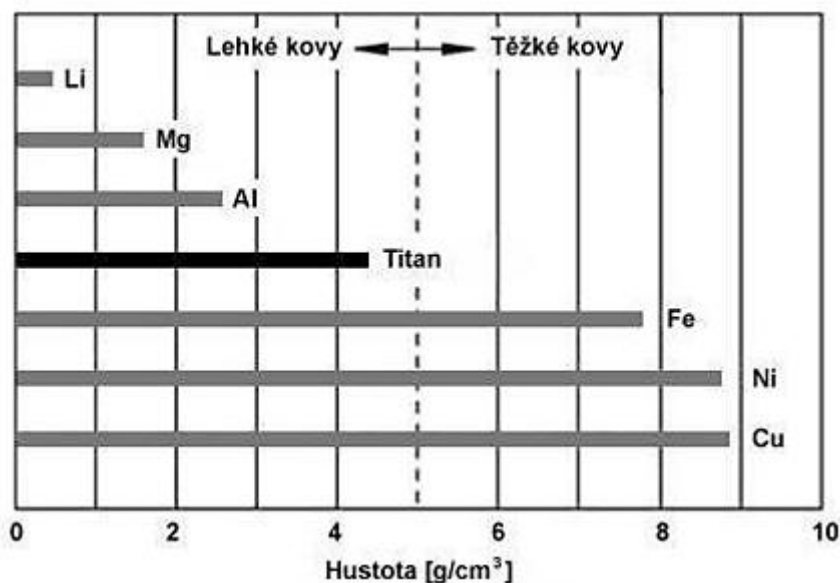
I přesto, že slitiny titanu přímo nespádají do kategorie superslitin, díky jejich vynikající odolnosti proti korozi, možnosti využití za velmi nízkých teplot a především neustálému vývoji a navyšování teploty, při které si z dlouhodobého hlediska zatížení zachovají pevnost, o nich skutečně můžeme částečně jako o superslitinách hovořit.



Obr. 2.2 Měrná pevnost v závislosti na teplotě použití vybraných konstrukčních materiálů ve srovnání se slitinami titanu a aluminidy [3]

Vývoj slitin titanu byl vyvolán a usměrňován v převážné míře požadavky konstruktérů leteckých motorů. Praktické použití titanu se datuje od r. 1948, kdy byly v USA vyrobeny první dvě tuny. V bývalém SSSR byl titan vyráběn od r. 1950. Surovinou je oxid titaničitý z minerálů rutilu nebo ilmenitu, který je převáděn chlorováním na chlorid titaničitý, a ten pak redukován hořčíkem na kovový titan. [4]

K přednostem titanu a jeho slitin patří zejména nízká měrná hmotnost (4505 Kg/m<sup>3</sup> pro titan), vysoká měrná pevnost srovnatelná, případně i vyšší, s měrnou pevností ocelí i za teplot, kdy méně hmotné slitiny hořčíku nebo hliníku nemohou být použity (450 – 600 °C). Nedostatkem titanu a slitiny titanu jsou vysoké náklady na jejich výrobu a zpracování, vyplývající z obtížného obrábění, vysoké reaktivity titanu za teplot nad 700 °C s plyny a žárovzdornými hmotami, z nutnosti nákladného tavení a odlévání ve vakuu nebo v ochranné atmosféře argonu, z obtížného tavného svařování, provázeného hrubnutím zrna a nepříznivými fázovými změnami při chladnutí spoje. Nedostatkem může být i nízký modul pružnosti v tahu ( $E = 115 \text{ GPa}$ ), špatné třecí vlastnosti a nemožnost zpracování vratného odpadu drahého materiálu ve větším množství. [4]

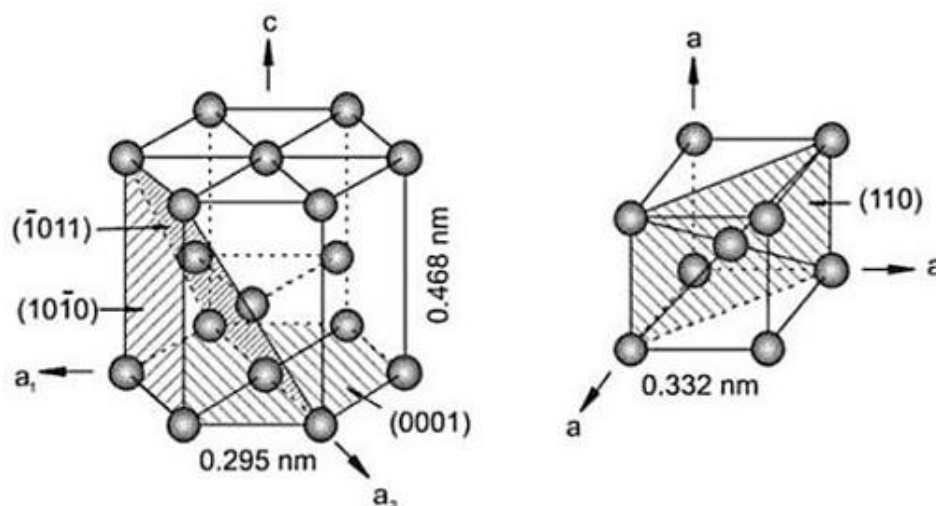


Obr. 2.3 Hustota vybraných kovů [3]

#### 2.4.1 Čistý titan

Titan s vysokou čistotou má pevnost v tahu  $R_m$  až 250 MPa, tažnost  $A_5$  až 60 %. Příměsi pevnost zvyšují až na 550 MPa, tažnost však současně klesá až na 20 %. Nejvyšší teplota pro dlouhodobé použití silově zatíženého titanu je asi 300 °C. [4]

Čistý titan prochází alotropickým přetvořením fáze alfa s mřížkou hexagonální těsného uspořádání do fáze beta s mřížkou kubickou prostorově centrovanou při teplotě 882,5 °C. Přísadové prvky mohou řídit stabilizaci buď fáze alfa, nebo fáze beta. Pomocí přísadových prvků může být fáze beta dostatečně stabilizovaná, aby existovala současně s fází alfa za pokojové teploty. Tato skutečnost tvoří základ pro vytvoření slitin titanu, které mohou být posíleny tepelným zpracováním. [4]



Obr. 2.4 Struktura titanu fáze alfa s mřížkou hexagonální těsného uspořádání a fáze beta s mřížkou kubickou prostorově centrovanou [3]

#### 2.4.2. Rozdělení slitin titanu

Slitiny titanu rozdělujeme dle konečné struktury vytvořené při pomalém ochlazení z žíhací teploty na:

- Slitiny alfa

Kromě alfa – stabilizátoru hliníku obvykle obsahují neutrálně působící cín a zirkon. Jsou to slitiny s velkou tepelnou stabilitou, dobrou pevností a odolností proti křehkému poškození i za velmi nízkých teplot. Mají dobrou žáropevnost do 300 °C. Optimální vlastnosti mají slitiny s asi 5 hm. % Al a 2 až 3 hm. % Sn. [4]

- Slitiny pseudoalfa

Do základní báze Ti – Al jsou přidány prvky stabilizující a zpevňující fázi beta. Dalšího zpevnění se dosahuje neutrálně působícím Zr a Sn. Obsah fáze beta bývá 2 až 6 hmot. %. Jsou to slitiny mající pevnost o 10 až 20 % větší než slitiny alfa a lepší tvařitelnost za pokojové teploty v důsledku přítomnosti fáze beta s větší plasticitou než má fáze alfa. [4]

- Slitiny beta a pseudobeta

Jsou to materiály dosud ve vývoji. Jejich hlavní předností je vysoká odolnost proti korozi a velmi dobrá tvařitelnost za pokojové teploty, daná b.c.c. mřížkou fáze beta. Nedo- statkem je větší hmotnost než u jiných slitin titanu a značná cena, protože přísadovými prvky ve velké koncentraci jsou kovy s velkou měrnou hmotností a vysokou teplotou tání, jejichž výroba v požadované čistotě je velmi obtížná a nákladná. Pevnost v tahu těchto sli- tin dosahuje po vytvrzení až 1400 MPa. [4]

- Slitiny alfa plus beta

Vyznačují se širokou škálou struktur a tedy i vlastností závisících na podmínkách tváření a tepelného zpracování. Mohou být tvořeny buď rovnoosými zrny nebo lamelami obou tuhých roztoků, případně směsmi obou těchto morfologií. Jsou to nejčastěji používa- né slitiny. Mají lepší svařitelnost v žíhaném stavu než slitiny alfa a pseudoalfa, lepší odol- nost proti únavovému namáhání a lze je tepelným zpracováním vytvrdit (do průměru max. 25 mm). Vytvrzené slitiny však mají sníženou lomovou houževnatost. Svařitelnost a odol- nost proti tečení je horší než u slitin alfa a pseudoalfa. Slitiny alfa plus beta se používají pro silově zatížené součásti jako lopatky turbín a kompresorů, spojovací elementy, součásti leteckých draků, části podvozků letadel, jízdní kola, sportovní náradí aj. [4]

### **2.4.3 Tepelné zpracování slitin titanu:**

Slitiny titanu se tepelně zpracovávají žíháním a vytvrzováním. Podle výšky teploty ohřevu a cíle žíhání je to žíhání na odstranění pnutí vzniklých po třískovém obrábění, rov- nání, svařování apod. Žíhání rekrytalizační k odstranění deformačního zpevnění slitin tvá- řených za studena. Pro slitiny alfa plus beta lze použít také žíhání izotermické, dvojité nebo stabilizační. Vytvrzování alfa plus beta slitin titanu sestává z rozpouštěcího ohřevu, kalení a stárnutí. Pro tenkostěnné součásti lze použít izotermické kalení. [4]

### **2.4.4 Slitina titanu Ti 6Al-4V**

Jedná se o vůbec nejběžnější slitinu titanu, která svým průmyslovým využitím za- hrnuje až 50 % [5] z celkového využívání slitin titanu. Je to slitina alfa plus beta s pevností v tahu až 1125 MPa [4]. Ti-6Al-4V je doporučována pro použití v provozních teplotách až do přibližně 350 °C. Ti-6Al-4V nabízí kombinaci vysoké pevnosti, malé hmotnosti, dobré svařitelnosti a odolnosti proti korozi, která vytvořila světový standard v leteckém užití. [5]

Tab. 2.3 Složení slitiny titanu Ti-6Al-4V [5]

Prvek	Procentuální obsah
Uhlík	do 0,10 %
Hliník	5,50 až 6,75 %
Dusík	0,05 %
Kyslík	do 0,020 %
Vanad	3,50 až 4,50 %
Železo	0,40 %
Vodík	0,015 %
Jiné	do 0,40 %
Titan	zůstatek

Při vystavení Ti-6Al-4V působení kyslíku ve vzduchu nebo vodě vytváří ihned a samovolně stabilní, souvislý, pevně přilnutý oxidický povlak. Ten odpovídá za jeho vynikající odolnost proti korozi v různém prostředí. Ti-6Al-4V je vysoce odolný proti plošné korozi ve vodních roztocích včetně mořské vody, stejně tak jako v oxidačních kyselinách, chloridech (za přítomnosti vody), pohonných hmotách a zásadách. Podmínky, při kterých je Ti-6Al-4V náchylný k plošné korozi jsou v přítomnosti redukčních kyselin nebo v suchém plynném chloru. [5]

Titan a jeho slitiny, včetně Ti-6Al-4V jsou náchylné k vodíkové křehkosti. Plynný nebo katodický vodík může difundovat do kovu a vytvářet křehké hydridy. Proto je důležité během výroby, zejména tepelného zpracování a moření v kyselinách minimalizovat množství vodíkových vměstků. Normy pro Ti-6Al-4V frézované výrobky určují maximální vodíkový limit kolem 150 miliontin. [5]

#### 2.4.5 Obrábění slitin titanu

Za několik uplynulých desetiletí se při obrábění titanu nedosáhlo razantních pokroků, které by zvýšily produktivitu. Titan bylo od počátku velmi těžké obrábět a tuto vlastnost si bohužel zachoval až do dnes. Rovněž ve vývoji nástrojových materiálů nezaznamenaly nové materiály takových úspěchů jako při obrábění ocelí.

Vzhledem k unikátním vlastnostem titanových slitin jsou široce používány v leteckém, automobilovém průmyslu, biomedicině apod.. Mezi výrobky z titanu najdeme například nádrže, bednění, nosné dílce konstrukcí, lopatky turbín, trysky motoru apod.. Využívání titanu, coby konstrukčního materiálu stále roste, jelikož rostou i požadavky na

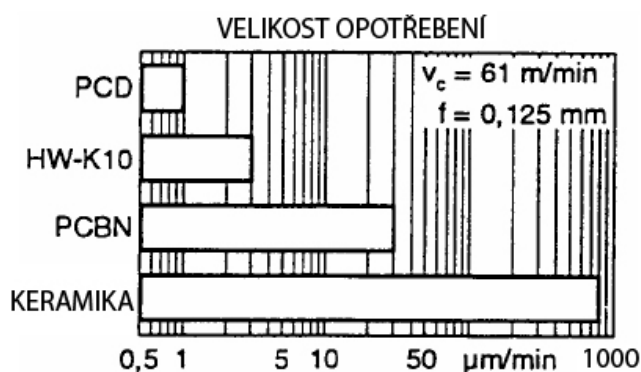


vyráběné součásti. Tento trend bude růst i nadále, proto se vyvíjí nemalé úsilí na zefektivňování obrábění titanu a tento obor se tak řadí mezi nejvýznamnější ve strojírenství.

Titan je velice reaktivní materiál a při obrábění vytváří na špičce nástroje nárůstek, což vede k předčasnému opotřebení nástroje vzhledem k utváření třísky. Převážná většina dnešních nástrojových materiálů má tendenci chemicky reagovat s titanem, jakmile teplota přesáhne 510°C [6].

Nízká tepelná vodivost titanu je příčinou výskytu vysokých teplot v místě kontaktu nástroje s obrobkem. Tyto vysoké teploty jsou hlavním faktorem způsobujícím nadměrné opotřebení. Při obrábění Ti-6Al-4V zhruba 80 % vzniklého tepla přechází díky nízké tepelné vodivosti titanu do nástroje [6]. Tepelná vodivost titanu je zhruba 1/6 tepelné vodivosti běžných ocelí.

Titan si zachovává svoji tvrdost a pevnost i za zvýšených teplot, čímž přispívá k opotřebení nástroje. Velmi vysoké mechanické namáhání se vyskytuje v nejbližší oblasti okolí břitu.



Obr. 2.5 Opotřebení při obrábění Ti-6Al-4V [2]

#### 2.4.5.1 Problémy při obrábění slitin titanu

Zmiňované vlastnosti slitin titanu dávají dobrý důvod zařadit je do skupiny těžko obrobitelných materiálů. Problémy při obrábění titanu mohou být zdůvodněny takto [6]:

- Vysoké tepelné napětí na řezné hraně způsobené odvodem tepla třískami a obrobkem. Kombinací nízké tepelné vodivosti a vysoké tepelné jímavosti musí být zhruba o 30% více tepla absorbováno řeznou hranou než při běžném obrábění ocelí. Při obrábění titanu jsou teploty zhruba dvakrát tak vyšší. Difúzní a adhezní pochody jsou proto zvýšeny, vyskytuje se vysoký teplotní gradient, jenž vytváří tepelné napětí.

- Vysoký tlak na řeznou hranu způsobený sníženou kontaktní plochou. Tento jev je způsobený nízkou plasticitou titanových slitin a dalším navyšováním při nárůstu řezné rychlosti, protože se zmenšuje úhel střížné roviny.
- Vznikají kmitající zatížení díky utváření článkovité třísky, která je způsobena velkou pevností materiálu za tepla.
- Dochází k poškození nástroje způsobené vytrháváním, způsobeným zejména vysokými řeznými silami.
- Kombinace Youngova modulu pružnosti s vysokou mezí kluzu povoluje pouze vznik malých plastických deformací. Materiál je elastický a odpružuje řezný tlak. Toto vede ke snižování efektivního úhlu hřbetu na fasetce. Tedy tření je navyšováno a jsou tímto podporovány vibrace. Mimo vysokých řezných sil, nízkobuzené frekvence způsobené relativně nízkými otáčkami, rovněž podporují vznik vibrací.
- Nebezpečí opotřebení díky difúzi, která vzniká schopností titanu reagovat s okolními prvky a dochází ke změkčování řezného materiálu.
- Silný sklon k adhezi díky akumulaci tepla v oblasti řezu umocňující opotřebení nástroje.
- Nebezpečí exotermní reakce titanových třísek s atmosférickým kyslíkem.

Všechny tyto překážky zapříčiňují konflikt s průmyslovým začleněním obrábění titanových slitin, protože navyšující se tepelné napětí způsobené vysokou řeznou rychlostí, silně podporuje opotřebení nástroje.

#### **2.4.5.2 Řezný materiál pro obrábění slitin titanu**

Pro obrábění titanových slitin s řeznou rychlostí menší než 60 m/min je vhodné použít jemnozrnné WC – Co karbidy. Podle ISO klasifikace je nejvýhodnější skupina M, jemnozrnné karbidy (0,07 – 0,1  $\mu\text{m}$ ) vykazují nižší lomovou houževnatost v porovnání s hrubozrnnými. Základní roli ve volbě řezného materiálu hraje především řezná rychlost. Při vysokorychlostním obrábění je podle [7] vhodné použít i PKD nebo PKNB, i když je to v rozporu s ostatními studiemi zabývajícími se řeznými materiály pro obrábění titanu. Při použití těchto materiálů dochází ke snižování řezných sil při zvyšování řezné rychlosti. Řezný materiál má vysokou tepelnou odolnost a tak dochází k měknutí obráběného materiálu vlivem vysokých teplot a tím lehčímu oddělování třísek.

Je na místě zvolit vhodný povlak, který nám zvýší pevnost nástroje za tepla, odolnost proti opotřebení, poskytne nám větší tepelnou stabilitu, odolnost proti oxidaci a rovněž může mít i vhodné lubrikační vlastnosti. Charakteristickými povlaky pro obrábění slitin titanu jsou TiC, TiN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiCN, TiAlN, TiZrN, TiB<sub>2</sub> a rovněž i diamantové povlaky. Dobrých výsledků lze dosáhnout i s multivrstvým CVD povlakem TiCN + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [4].

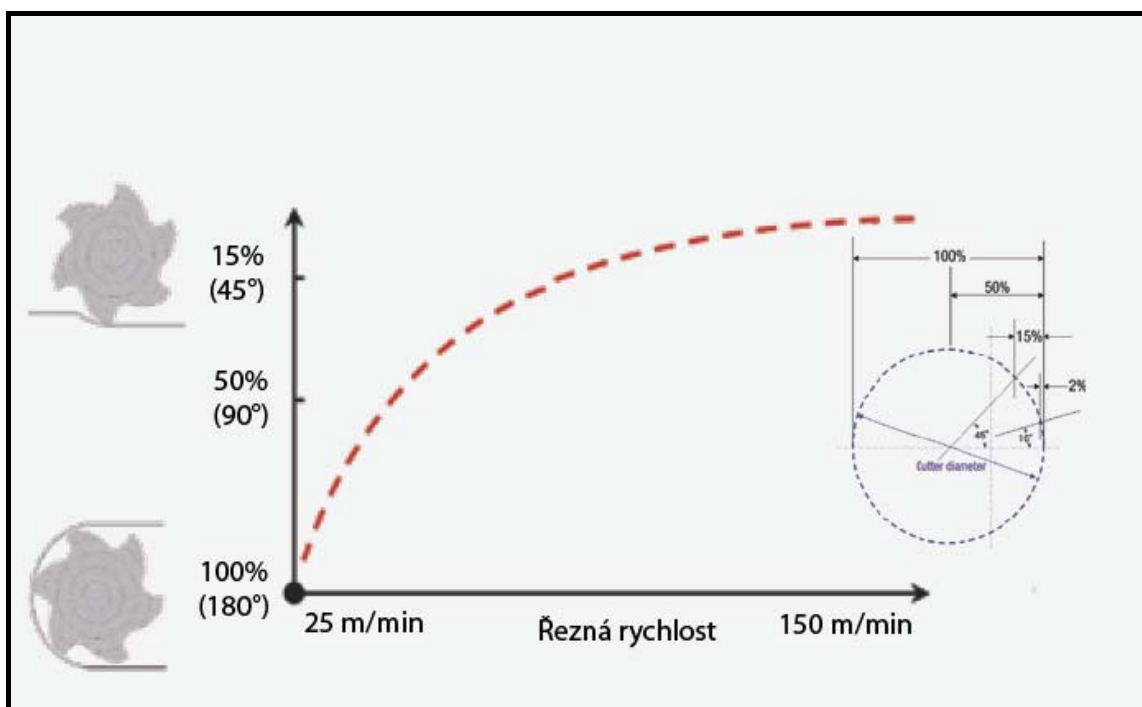
Tab. 2.4 Rozsah doporučených řezných rychlostí pro vybrané slitiny titanu dle [8]

Skupina	Název	Tvrдост	R <sub>m</sub>	K <sub>c</sub> 0,6	V <sub>c</sub> <sub>min</sub>	V <sub>c</sub> <sub>max</sub>
		HRB/HRC	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	m/min	m/min
α	Ti-5Al-2.5Sn	36 HRC	1130	2400	48	100
α	Ti-6Al-4Zr-2Mo-2Sn	28 HRC	900	1500	51	108
α	Ti-8Al-1Mo-1V	35 HRC	1100	2400	48	100
β	Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn			2200	27	58
β	Ti-13V-11Cr-3Al			2200	27	58
β	Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	32 HRC	1000	2200	27	58
β	Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al	40 HRC	1270	2200	27	58
β	Ti 10.2.3	35 HRC	1100	3000	22	46
β-αβ	Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr	40 HRC	1270	3400	24	50
αβ	Ti-6Al-4V	36 HRC	1130	2400	48	100
αβ	Ti-6Al-5Zr-0.5Mo-0.25Si			2400	40	85
αβ	Ti-6Al-5Zr-4Mo-Cu-0.2Si			2400	40	85
αβ	Ti-6Al-6V-2Sn	35 HRC	1100	2400	44	93
αβ	Ti-7Al-4Mo			2200	40	85
αβ	3-2.5	24 HRC	820	1600	51	108
αβ	6-4ELI	32 HRC	1000	2200	49	104
αβ	6-2-4-6	36 HRC	1130	2300	48	100
αβ	Ti-17	38 HRC	1200	2500	44	93
αβ	Ti-4Al-4Mo-2Sn-0.5Si	35 HRC	1100	2400	40	85
αβ	Ti-4Al-4Mo-4Sn-0.5Si			2400	40	85
čistý Ti	Ti 99.5	100 HRB	780	1450	73	155
čistý Ti	Ti 99.6	90 HRB	600	1450	80	170
čistý Ti	Ti 99.7	80 HRB	510	1450	88	185
čistý Ti	Ti 99.8	70 HRB	430	1450	95	201

### 2.4.5.3 Vhodná strategie frézování

Při obrábění titanových slitin je nutné řídit strategii obrábění tak, aby břit opouštěl obrobek s nejnižším možným mechanickým zatížením, aby nedošlo k tlakovému napětí. Obráběcí strategie by měla být volena především tak, aby mohlo odcházet co největší množství tepla do obrobku – velká a měnící se kontaktní plocha. Zastavování posuvu, když je nástroj v řezu je nevhodné, jelikož dojde nárůstu tepla v oblasti kontaktu nástroje s obrobkem, což následně vede k destrukci nástroje.

Pro dosažení dostatečné trvanlivosti nástroje by se měl volit vhodný poměr mezi velikostí záběru nástroje a řeznou rychlostí. Zatímco pro obrábění ocelí se běžně používá záběr 100 %, u slitin titanu je vhodné obrábět pouze se záběrem 15 % [8], pokud to operační povoluje (viz obr. 2.6).



Obr. 2.6 Vztah řezné rychlosti a velikosti záběru nástroje [8]

### 2.4.5.4 Procesní kapaliny

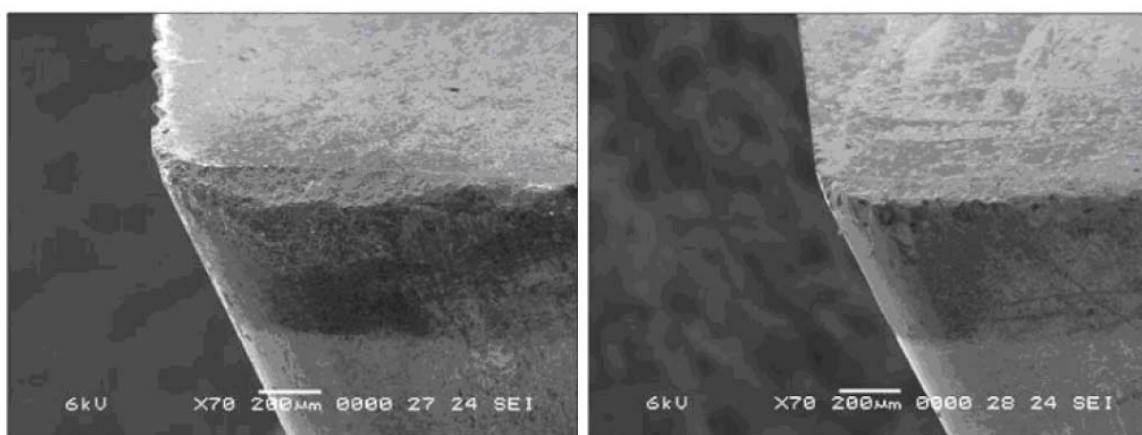
Při obrábění titanových slitin je vhodné používat procesní kapaliny. Procesní kapalina napomáhá odvádět část tepla z řezu a tím snižuje tepelné namáhání nástroje. Zvyšuje tak životnost nástroje až o několik desítek procent. Při vysokotlakém chlazení může být životnost nástroje navýšena až o 300% v porovnání s konvenčním chlazením. Účinným způsobem, jak řídit teplotu při obrábění titanových slitin, je použití nízkoteplotního chlazení.

Bohužel tento způsob chlazení má negativní vliv na obráběný materiál. Rovněž dochází k nárůstu řezných sil, jelikož obráběný materiál má vyšší pevnost, jež je způsobena nízkou teplotou. Také byly prokázány dobré výsledky při chlazení dusíkem při drážkování Ti-6Al-4V. Životnost nástroje v tomto případě vzrostla o zhruba 170 % [7].

#### 2.4.5.5 Obrábění předehřátého titanu

Předehřátím titanu můžeme při obrábění dosáhnout daleko lepších výsledků. Vlivem zvýšené teploty obrobku dochází ke snížení jeho tvrdosti, což vede ke zjednodušení odeírání třísky – sníží se řezný odpor. Tato metoda má pozitivní vliv na vlastnosti obrobku, řezné síly a zejména trvanlivost nástroje. K předehřevu se může použít plynový hořák, ohřívání v peci, indukční ohřev apod. Při obrábění konkrétní slitiny Ti-6Al-4V je možné navýšit trvanlivost nástroje až o 200 % použitím předehřevu [9]. Rovněž má předehřev pozitivní vliv na velikost řezných sil, což je způsobené změknutím obrobku.

Vliv na opotřebení nástroje je patrný z obr. 2.7, kde byl nástroj s předehřátým obrobkem použitý dvojnásobnou dobu v řezu, než nástroj obráběcí materiál pokojové teploty. Bez předehřevu docházelo k vytrhávání materiálu, jenž je typickým opotřebením při obrábění slitin Ti. Zatímco s použitím předehřevu není opotřebení tak razantní.



Obr. 2.7 a) Opotřebení - pokojová teplota      b) Opotřebení - předehřev na 650°C [9]

#### 2.4.6 Použití slitin titanu

Titan jako konstrukční materiál se používá hlavně v chemickém, papírenském a textilním průmyslu. Je vhodný zejména tam, kde se pracuje s vlhkým chlorem a jeho sloučeninami, při výrobě umělých hmot, kyseliny dusičné, sody, hnojiv. Výborně odolává mořské vodě (oplašťování lodí, lodní kování). V galvanotechnice a mořárnách se osvědčil na

koše, držáky elektrod, topné a chladicí hady. Zdravotní nezávadnost titanu dovoluje jeho použití v potravinářském a farmaceutickém průmyslu, v lékařství pro chirurgické nástroje, šrouby, protézy, v dentální technice pro zubní implantáty. Nízká měrná hmotnost spolu se značnou pevností je žádanou vlastností zejména v letectví, v raketové technice, v dopravě a v jiných oborech. Dobrá tvařitelnost za tepla i za studena a dobrá svařitelnost umožňují vyrábět z titanu např. odstředivá čerpadla, reakční nádoby, výměníky tepla, armatury, měřicí a regulační přístroje. [4]

#### **2.4.7. Směr vývoje slitin titanu**

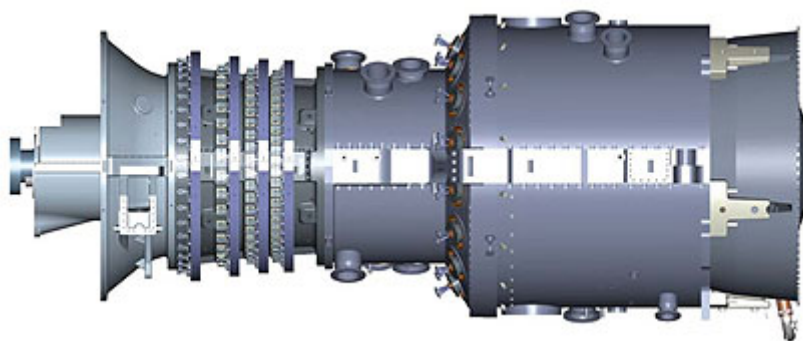
Většina slitin titanu je určena pro dlouhodobou funkci v zatíženém stavu při teplotách až 450 °C. Existují však slitiny konstrukčně využitelné za teplot 550 až 600 °C. Uvažuje se o slitinách pro teploty ještě vyšší. Každé zpevnění kovové hmoty však současně znamená zhoršení jejich funkčních vlastností (např. dlouhodobé tvárnosti, odolnosti proti oxidaci, strukturní stability, rázové houževnatosti). U některých vývojových slitin titanu bylo dosaženo statické pevnosti v tahu až 1500 MPa. Praktické použití však nenašly právě pro nedostatečnou tvárnost a nestabilitu struktury při dlouhodobém zatížení. [2]

Vývoj slitin titanu současně probíhá i v oblasti zpracovatelských technologií. Ukazuje se, že tato cesta k dosažení lepších vlastností slitin titanu je snadnější a stabilnější než samotný materiálový vývoj. Podstatně větší tvarovou a rozměrovou přesnost spolu s lepšími vlastnostmi přináší izometrické tváření a tváření v superplastickém stavu. Efekt superplasticity se nejvýrazněji projevuje u slitin alfa plus beta. K moderním způsobům spojování titanu a slitin titanu patří difuzní pájení a svařování elektronovým paprskem nebo laserem ve vakuu. Perspektivní je výroba součástí ze slitin titanu práškovou metalurgií. Hlavním a dosud nevyřešeným problémem je však obtížná a nákladná výroba prášků bez nečistot a zamezení jejich znečišťování při vlastním zpracování. Prášky ze slitin titanu jsou totiž charakteristické vysokou reaktivitou se vzdušnými plyny. [2]

### **2.5 Použití superslitin**

Vysokoteplotní využití superslitin jsou velmi rozsáhlá, zahrnují především letecký průmysl, kde jsou využívány na různé komponenty plynových turbín a v elektrárnách na některé komponenty parních turbín. Neméně významným odvětvím je automobilový průmysl, kde jsou superslitiny využívány na turbodmychadla a výfukové ventily. Dále jsou to nástroje a matrice pracující v nadměrných teplotách a matrice pro odlévání ve strojíren-

ském průmyslu nebo zařízení pro tepelné zpracování kovů. Využití najdou také v medicíně, jako například protézní přístroje nebo v zubním lékařství. V neposlední řadě je to chemický a petrochemický průmysl. Význam superslitin na současném trhu je dobře prokazatelný skutečností, že zatímco v roce 1950 byla z celkového váhového množství leteckého motoru s plynovou turbínou zhotoveno asi jen 10 %, rokem 1985 toto číslo stoupl o 50 %. Jejich vysoká pevnost společně s odolností proti korozi udělala ze superslitin jisté standardní materiály pro biomedicíncké zařízení. Superslitiny lze také poměrně dobře využít v kosmonautice, kde se teploty pohybují hluboko pod bodem mrazu. [1]



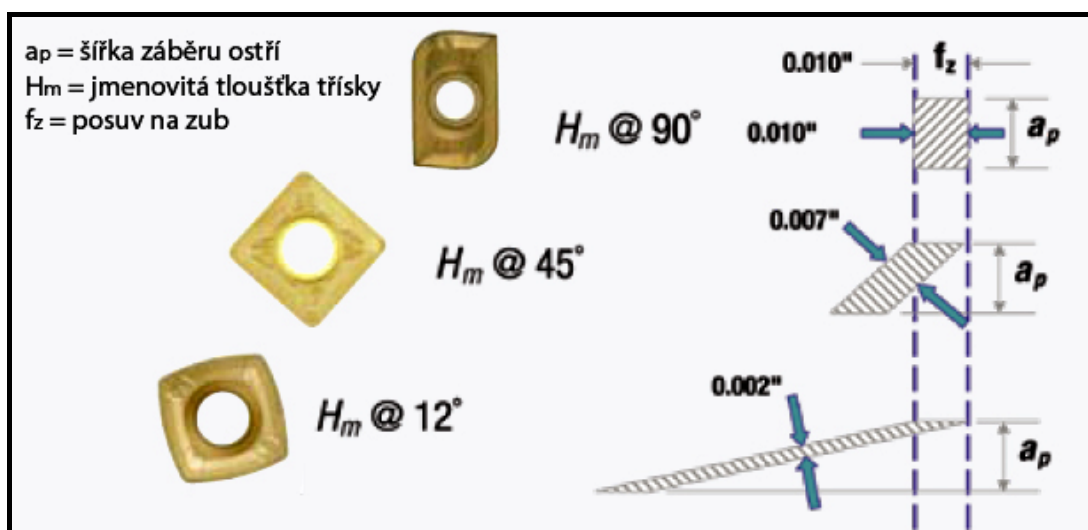
*Obr. 2.8 Plynová turbína*

### 3 NÁVRH VHODNÉ ÚPRAVY NÁSTROJE

Funkčnost obráběcího nástroje je charakterizována řezivostí, což je schopnost nástroje udržet si tvar (geometrii) břitu. Na řezivosti obráběcího nástroje se podílejí zejména materiál nástroje, geometrie nástroje, povlak a řezné podmínky. Geometrii nástroje by bylo možné rozdělit z hlediska pozorovatele na makrogeometrii a mikrogeometrii. Do skupiny makrogeometrie by spadl tvar nástroje, řezné úhly, velikost řezné hrany, rádius špičky apod. Mikrogeometrie by pak byla geometrie nástroje ovlivněná způsobem výroby, odchylkami způsobené povlakováním a rovněž také způsob provedení řezné hrany.

#### 3.1 Geometrie nástroje

Výrobci nástrojů doporučují pro obrábění titanových slitin použití ostré geometrie s minimálním zaoblením řezné hrany. Díky této geometrii nedochází k velkému nárůstu řezných sil a teploty v řezu. Vzhledem k nízké plasticitě titanu a zeslabení řezné hrany broušením nástroje, by neměly být použity geometrie s utvařečem třísky [7]. Při porovnání řezných úhlů nástrojů od jednotlivých výrobců nelze specifikovat nejčastější geometrii nástroje. Geometrie se liší v řádech několika stupňů a rovněž geometrie řezné hrany je odlišná. Tato odchylka je způsobena širším rozsahem použití daných nástrojů, jelikož se používají tyto nástroje na obrábění jak titanových slitin tak i třeba nerezových ocelí.









Obr. 3.1 Vliv nástrojového úhlu na kontakt obrobku s břitem [8]

Je vhodné použít destičku s malým nástrojovým úhlem (viz obr. 3.1). Při obrábění je s obrobkem v kontaktu delší část řezné hrany a tím dochází k lepší distribuci tepla a navýšení trvanlivosti nástroje [8].

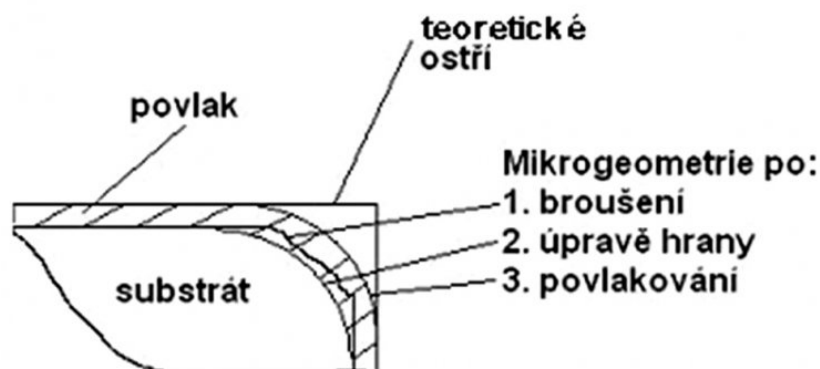


Podle normy ČSN ISO 513 rozlišujeme šest druhů provedení řezné hrany dle geometrie (viz obr. 3.2). Geometrie řezné hrany se volí dle způsobu obrábění, operace obrábění, vlastnostech obráběného materiálu, požadovaných řezných podmínek atd..

Provedení řezné hrany	
 <b>F</b>	Ostré hrany
 <b>E</b>	Zaoblené hrany
 <b>T</b>	Hrany s fazetkou
 <b>S</b>	Zaoblené hrany s fazetkou
 <b>K</b>	Hrany s dvojitou fazetkou
 <b>P</b>	Zaoblené hrany s dvojitou fazetkou

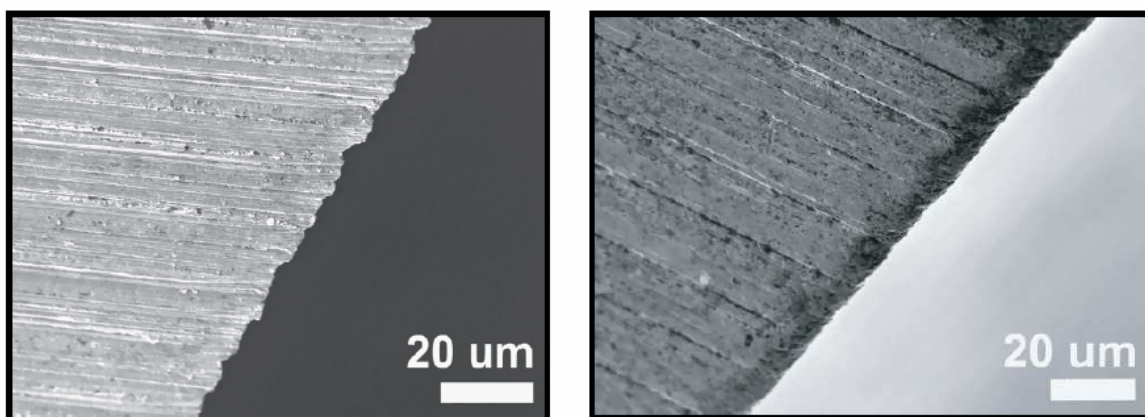
Obr. 3.2 Způsoby provedení řezné hrany dle ČSN ISO 513 [10]

Zaoblení řezné hrany se provádí jako jedna ze závěrečných operací při výrobě nástrojů z SK. Následuje operaci broušení. V dnešní době se používá mnoho způsobů pro výrobu zaoblení řezné hrany, mezi něž patří pískování, omílání v granulátech, kartáčování, magnetické leštění, proudové broušení [11]. Podstatou konvenčních metod zbrusování řezné hrany je působení abraziva (křemičitý písek, granule s minerálním olejem apod.) na požadované místo nástroje. Velikost zaoblení je ovlivněna dobou působení abraziva, intenzitou daného procesu, účinností abraziva a rovněž i strukturou substrátu slinutého karbidu. Souhrn všech těchto faktorů musí mít za následek cílené zaoblení, které je na výrobku ještě ovlivněno tloušťkou povlaku (viz obr. 3.3). Nepřesnosti ve výrobě zaoblení mohou mít za následek dramatické navýšení opotřebení nástroje.



Obr. 3.3 Schéma břitu nástroje při výrobě zaoblení [11]

Po broušení obráběcího nástroje je hrana břitu nerovnoměrná. Nerovnoměrnosti jsou přibližně o velikosti použitých brusných zrn (viz obr. 3.4). Tyto nerovnoměrnosti jsou způsobené fluktuací v geometrii broušení, kvalitě brusných kotoučů a kvalitě substrátu [12]. Při následném povlakování může docházet na takto nerovnoměrných hranách k nedokonalému nanesení vrstvy povlaku. Příčinou nízké adheze v těchto místech dochází při obrábění k odlupování povlaku, což má negativní vliv na trvanlivost nástroje.



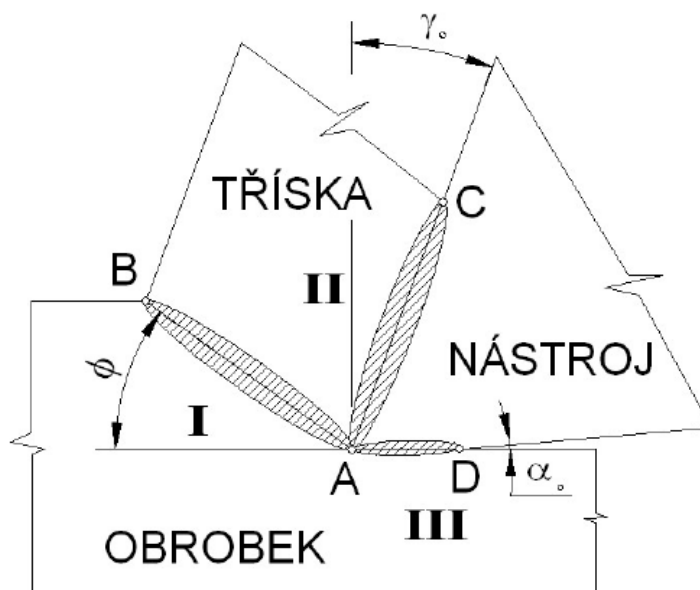
Obr. 3.4 a) Břit nástroje z SK před úpravou      b) Břit nástroje z SK po úpravě [12]

### 3.1.1 Vliv zaoblení řezné hrany na opotřebení břitu [13]

Použitím zaoblení břitu navyšujeme stabilitu nástroje a zvyšujeme rovněž jeho odolnost proti opotřebení vytrháváním. Nicméně je znám fakt, že účinnost nástroje značně klesá, když se tloušťka plasticky zdeformované vrstvy – oblast terciální plastické deformace (viz obr. 3.5, 3.6) – přibližuje k dvojnásobku zaoblení břitu.



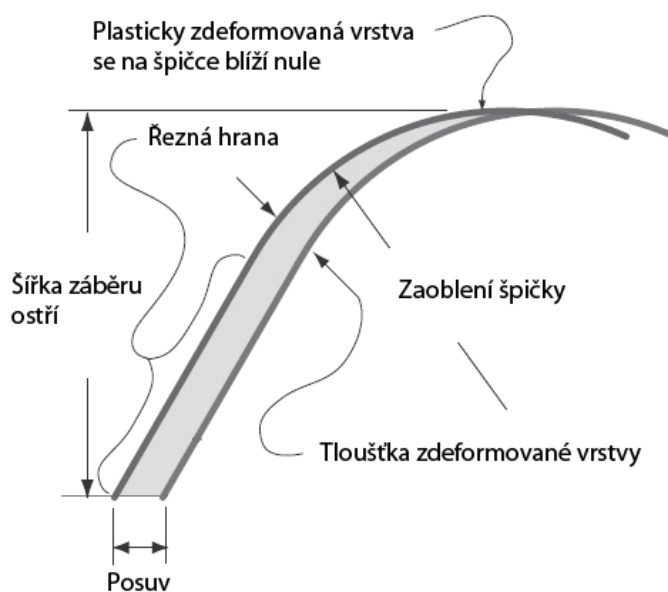
Obr. 3.5 Metalografický výbrus kořenu třísky při soustružení [14]



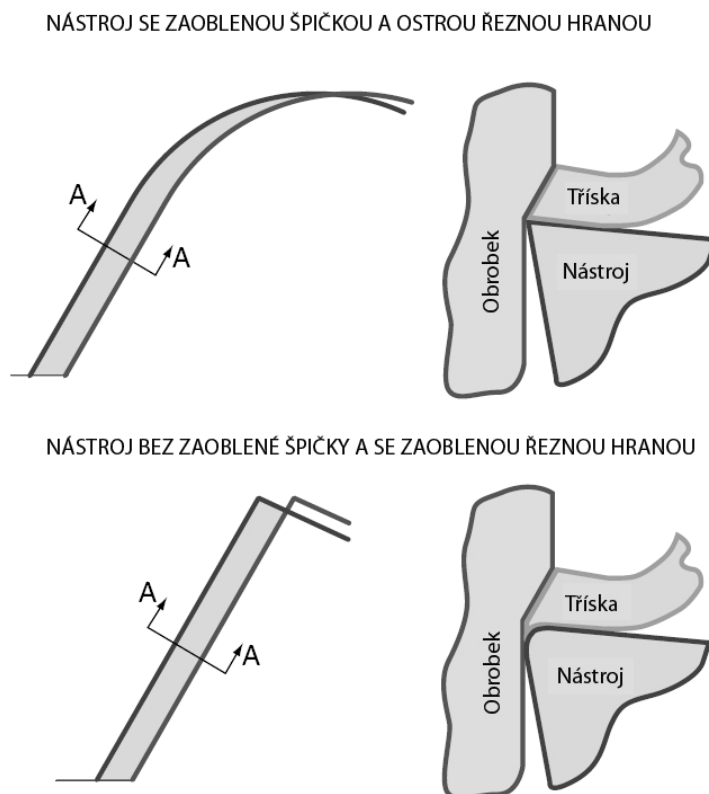
Obr. 3.6 Oblasti plastických deformací v kořenu třísky [14]

Tenhle jev navyšuje náklady počítané na jednotku odebraného materiálu. Pokud je plasticky zdeformovaná vrstva tenká, tak jako při těžkém obrábění nebo vrtání, zaoblení řezné hrany navyšuje teplotu, řezné síly, zbytková napětí, rozměrové odchylky a požadavky na výkon stroje. Řezný proces se stává méně výkonným a navyšují se energetické požadavky, když poměr plasticky zdeformované vrstvy k zaoblení řezné hrany klesá.

Tloušťka této plasticky zdeformované vrstvy je řízená především velikostí posuvu. Vliv má rovněž i radius zaoblení špičky nástroje. Plasticky zdeformovaná vrstva se zmenšuje podél radiusu špičky, až na špičce nástroje zaniká (viz obr. 3.7, 3.8).



Obr. 3.7 Plasticky zdeformovaná vrstva [13]



Obr. 3.8 Tvar plasticky zdeformované vrstvy v závislosti na geometrii nástroje [13]

### 3.1.2 Měření zaoblení řezné hrany

Při výrobě řezných nástrojů jsou nezbytným doplňkem měřicí přístroje. Vzhledem k tomu, že velikost zaoblení přímo ovlivňuje trvanlivost nástroje, je důležité mít odpovídající techniku na měření skutečného zaoblení na řezné hraně nástroje. Pro běžná dílenská měření je nejpoužívanějším přístrojem optický mikroskop, který pomocí šablony určí přibližný rozměr zaoblení. Jedná se o metodu rychlou, ovšem na provedení velmi citlivou, neboť vyžaduje přesné kolmé přiložení šablony k hraně.

Přesné výsledky měření zaoblení poskytuje mechanické měření, založené na kopírování hrany hrotem a následném vyhodnocení nasnímané geometrie na obrazovce. Obsluha poté vyhodnotí rozměry s přesností na mikrometry.

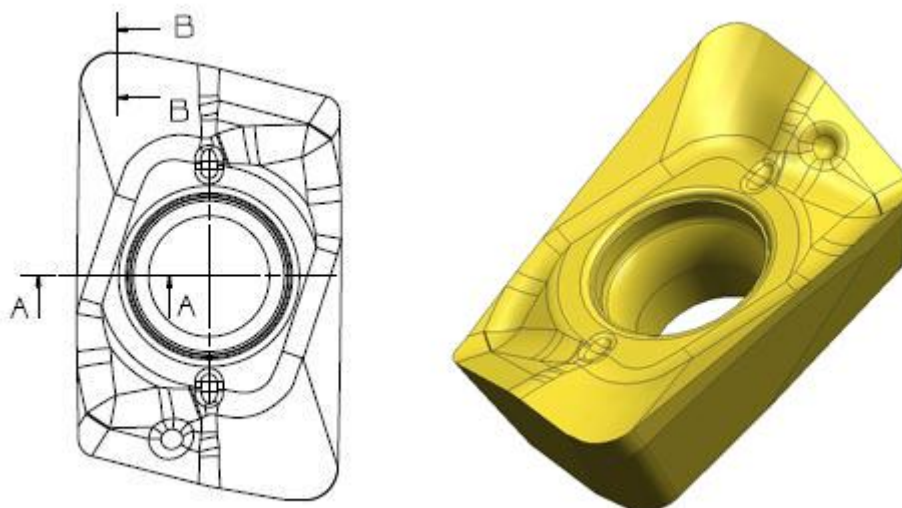
Pro měření zaoblení se dá rovněž využít i optické snímání těles s následným 3D vyhodnocením v CAD systému. Pomocí kamery se nasnímá síť bodů, které jsou poté převedeny na těleso. Vzniklé těleso je možné graficky i rozměrově porovnat s teoretickým modelem nebo vyhodnotit průběh velikosti zaoblení po celé délce hrany.

## 4 DISKUZE EXPERIMENTÁLNÍCH PRACÍ

Praktické ověření vlivu zaoblení řezné hrany frézovací destičky při obrábění slitiny titanu Ti-6Al-4V probíhalo ve zkušebnách firmy Seco Tools AB ve Švédsku. Cílem zkoušek bylo zjistit nejvhodnější velikost zaoblení hrany s ohledem na trvanlivost destičky. Aby nedocházelo k nárůstu řezných sil, je pro obrábění slitin titanu vhodné použít destičku s ostrou geometrií. Jelikož má testovaná destička úhel břitu  $58^\circ$ , je pro obrábění slitin titanu velmi vhodná. Naopak příliš ostrá řezná hrana není stabilní, a proto je zapotřebí najít vhodný kompromis mezi geometrií a velikostí zaoblení. Vzhledem k utváření třísky byla destička již dříve v minulosti testována.

### 4.1 Testované destičky

Jedním z posledních výrobků společnosti Seco Tools AB je destička XOEX090808FR-M06 z rodiny Mikro Turbo pro kopírovací frézování. Do výroby bylo zadáno dle různého zaoblení řezné hrany pět skupin těchto destiček po dvaceti kusech. Tolerance na zaoblení byla  $\pm 5 \mu\text{m}$ . Jednotlivé skupiny destiček byly abecedně rozlišeny na skupinu A se zaoblením  $10 \mu\text{m}$ , skupinu B se zaoblením  $20 \mu\text{m}$ , skupinu C se zaoblením  $30 \mu\text{m}$ , skupinu D se zaoblením  $40 \mu\text{m}$ , plus poslední skupinu destiček E se zaoblením  $30 \mu\text{m}$  z běžné objednávky pro zákazníka. Toto zaoblení bylo následně u třech kusů z každé skupiny ve dvou místech přeměřeno a skutečné hodnoty zaoblení zaznamenány. Dle výsledků přeměření lze vidět, že velikosti zaoblení jsou mnohdy mimo toleranci. Díky tomuto byla ve výrobě zavedena přísnější kontrola zaoblení.



Obr. 4.1 Testovaná destička XOEX090308FR-M06

Tab. 4.1 Skutečné zaoblení řezné hrany destiček A – 10  $\mu\text{m}$ 

Destička	Zaoblení [ $\mu\text{m}$ ]	
	řez A	řez B
č.1	8	13
č.2	7	12
č.3	10	14

Tab. 4.2 Skutečné zaoblení řezné hrany destiček B – 20  $\mu\text{m}$ 

Destička	Zaoblení [ $\mu\text{m}$ ]	
	řez A	řez B
č.1	17	13
č.2	15	17
č.3	20	20

Tab. 4.3 Skutečné zaoblení řezné hrany destiček C – 30  $\mu\text{m}$ 

Destička	Zaoblení [ $\mu\text{m}$ ]	
	řez A	řez B
č.1	25	17
č.2	23	20
č.3	24	20

Tab. 4.4 Skutečné zaoblení řezné hrany destiček D – 40  $\mu\text{m}$ 

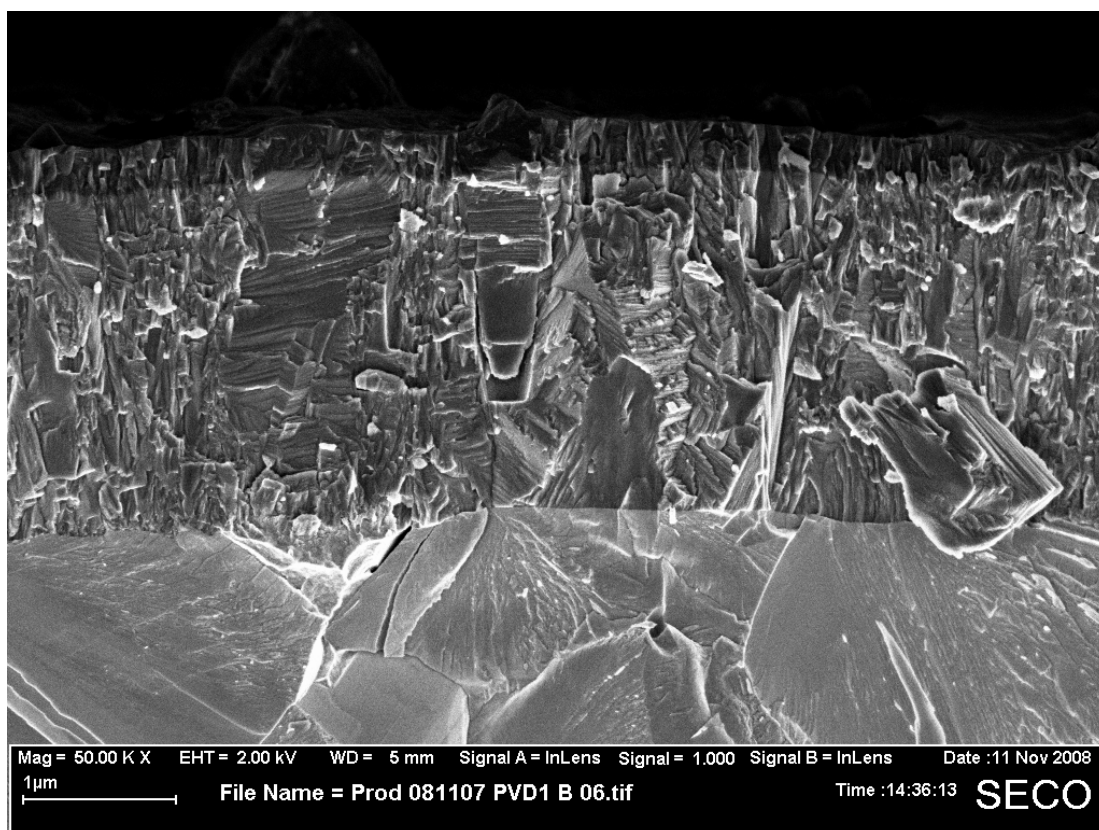
Destička	Zaoblení [ $\mu\text{m}$ ]	
	řez A	řez B
č.1	35	30
č.2	31	33
č.3	28	31

Tab. 4.5 Skutečné zaoblení řezné hrany destiček E – 30  $\mu\text{m}$ 

Destička	Zaoblení [ $\mu\text{m}$ ]	
	řez A	řez B
č.1	16	14
č.2	16	12
č.3	15	13

#### 4.1.1 Materiál testovaných destiček

Testované destičky byly zhotoveny z materiálu s označením F40M. Jedná se o PVD povlakovaný (Ti,Al)N-TiN materiál určený jak pro dokončovací operace tak i pro hrubování. Materiál je první volbou pro obrábění s malými posuvy a nízkými rychlostmi. Má výborné vlastnosti pro obrábění, kde by mohlo docházet k vibracím a rovněž tam, kde se obrábí s chladicí kapalinou. Doporučen pro obrábění superslitin. [15]



Obr. 4.2 Struktura materiálu F40M

#### 4.2 Obráběný materiál

Tab. 4.6 Typické pevnostní vlastnosti slitiny Ti-6Al-4V při pokojové teplotě [5]

Mez pevnosti $R_m$	1380 až 2070 MPa
Mez kluzu $R_e$	825 až 895 MPa
Pevnost ve smyku $\tau$	480 až 690 MPa

#### 4.3 Obráběcí stroj

Zkoušky byly prováděny na univerzálním 5-osém obráběcím centru VF-5/40TR od výrobce Haas Automation, Inc. s řídicím systémem Heidenhein.



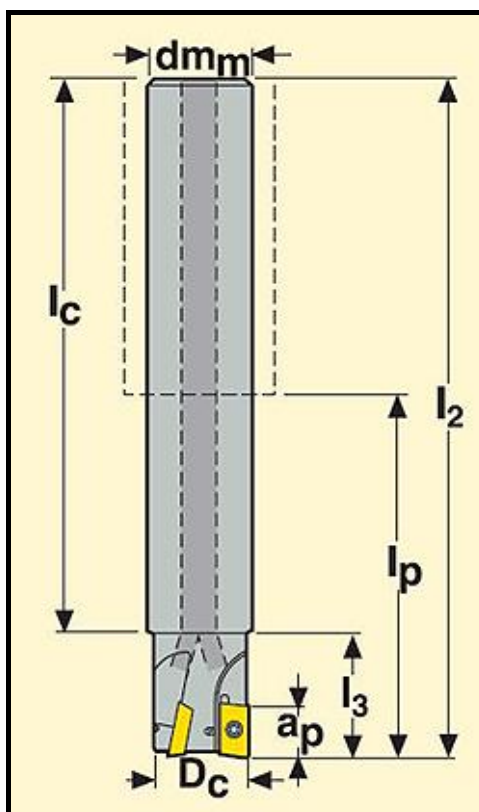
#### 4.4 Průběh zkoušek

Při použití maximálních doporučených hodnot z katalogu byla destička schopná obrábět skoro jednu hodinu. Aby došlo k urychlení opotřebení destičky a současně snížení nákladů na probíhající test, probíhaly všechny zkoušky za daleko vyšších řezných podmínek, než jsou hodnoty doporučované pro zákazníky.

Tab. 4.7 Řezné podmínky zkoušek

Řezná rychlost $v_c$	60 m/min
Posuv na zub $f_z$	0,13 mm/zub
Šířka záběru ostří $a_p$	2 mm
Šířka řezu $a_e$	5 mm
Průměr frézy $D$	20 mm

Pro všechny testované destičky byl čas obrábění 30,49 minut. Tento čas vychází z velikosti obrobku a konstantního počtu průjezdů. Pro urychlení testu a úsporu obráběného materiálu byla v nástroji R217.69-2020.0-09-2A upnuta pouze jedna destička. Pro zamezení vzniku plastické deformace špičky z důvodu přetížení břitu vysokými teplotami řezného procesu byla při obrábění použita chladicí kapalina.



Obr. 4.3 Fréza R217.69-2020.0-09-2A [15]



#### 4.5 Výsledky zkoušek

Po uplynutí potřebného obráběcího času byla destička vyjmuta a hodnota opotřebení na hřbetě VB následně přeměřena na optickém mikroskopu. U jedné destičky ve skupině C a všech destiček ve skupině D bylo poškození bříty natolik velké, že změření hodnoty opotřebení nebylo vůbec možné.

*Tab. 4.8 Velikost opotřebení VB testovaných destiček*

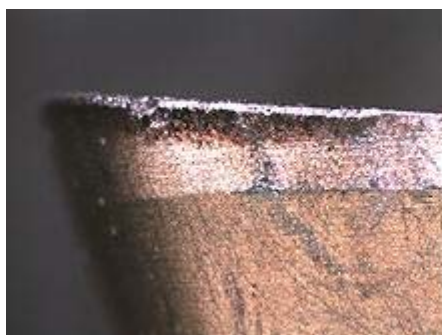
Destička	A – 10 $\mu\text{m}$	B – 20 $\mu\text{m}$	C – 30 $\mu\text{m}$	D – 40 $\mu\text{m}$	E – 30 $\mu\text{m}$
č.1	0,253 mm	0,147 mm	0,149 mm	neměřitelné	0,157 mm
č.2	0,171 mm	0,202 mm	0,354 mm	neměřitelné	0,299 mm
č.3	0,364 mm	0,127 mm	neměřitelné	neměřitelné	0,099 mm



*a) destička A - hřbet*



*b) destička A - čelo*



*c) destička B - hřbet*



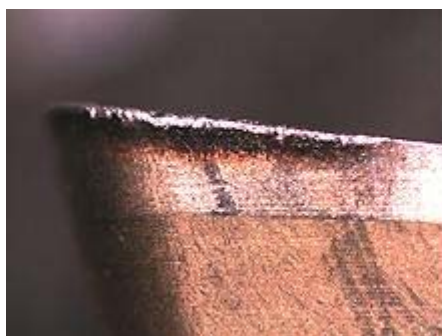
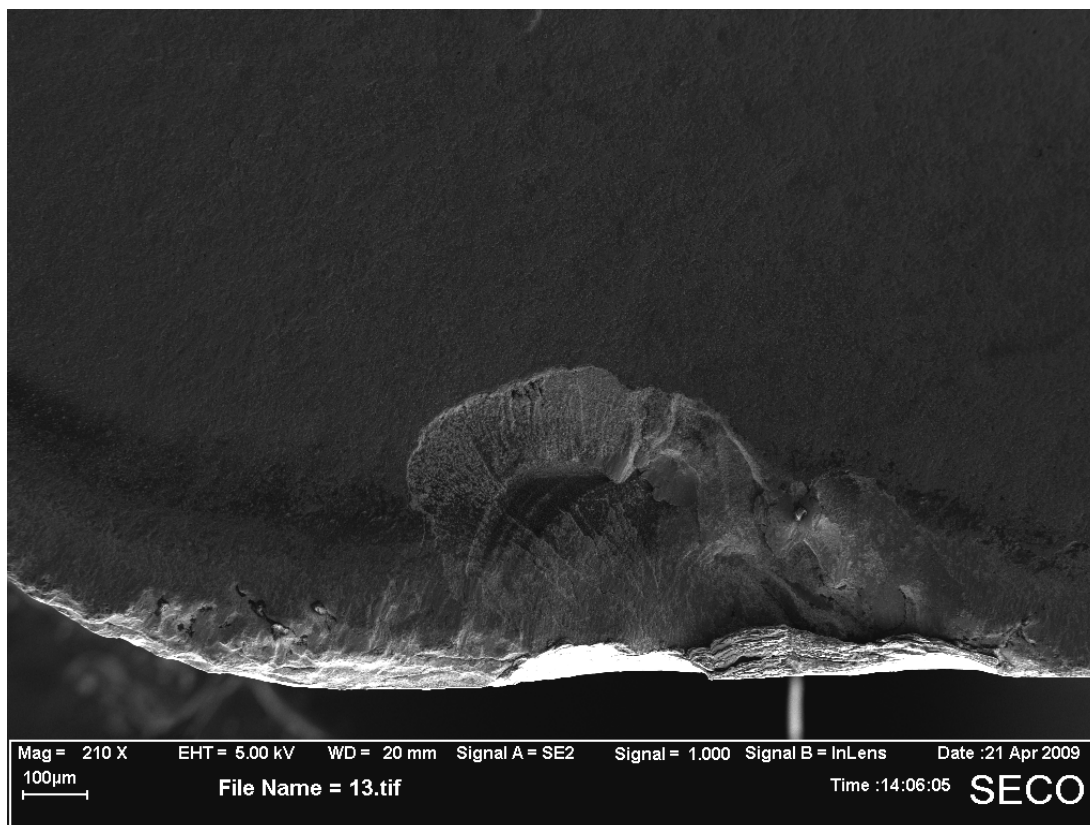
*d) destička B - čelo*

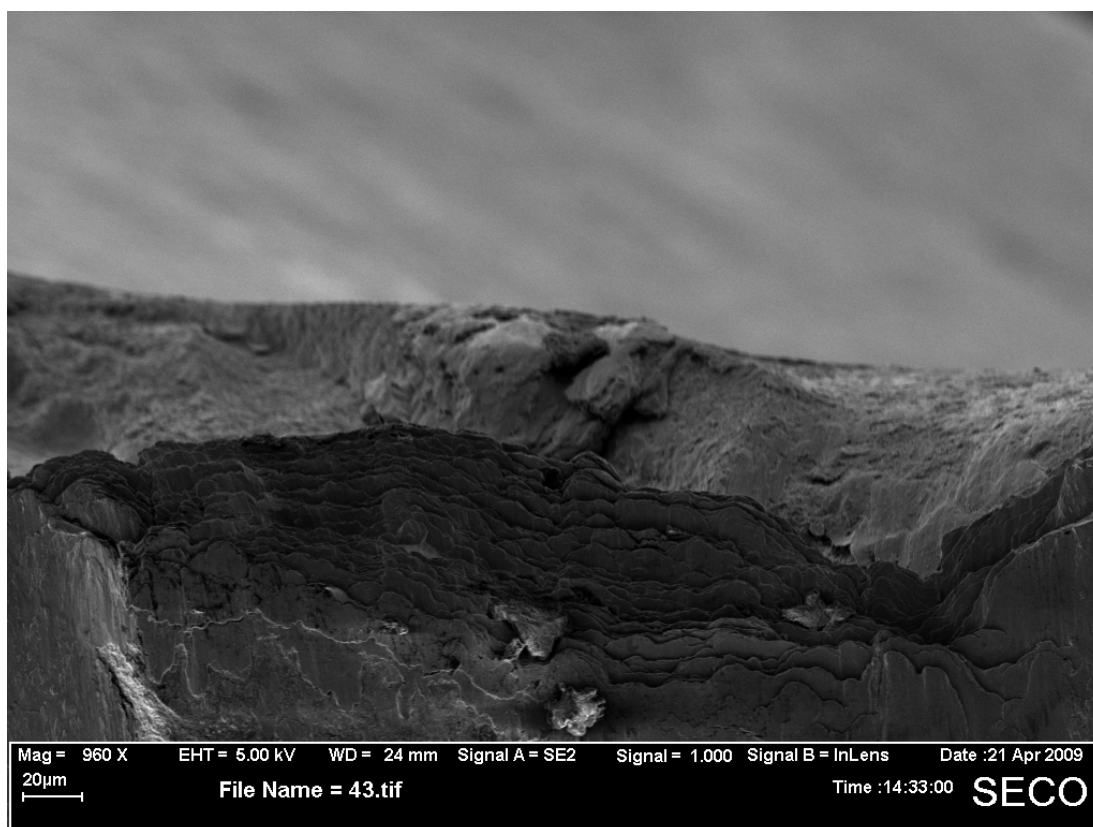


*e) destička C - hřbet*



*f) destička C - čelo*

*g) destička D - hřbet**h) destička D - čelo**i) destička E - hřbet**j) destička E - čelo**Obr. 4.4 Opotřebení vybraných destiček z jednotlivých skupin**Obr. 4.5 Detail opotřebení čela destičky skupiny A*



*Obr. 4.6 Detail opotřebení hřbetu destičky skupiny A*

#### 4.6 Vyhodnocení získaných výsledků

U všech testovaných destiček se příkon obráběcího stroje pohyboval stále kolem přibližně stejných hodnot. Také poslechově nebyly patrné žádné větší rozdíly mezi jednotlivými destičkami s různými zaobleními. Tato různá zaoblení řezné hrany neměly vliv ani na utváření třísky, neboť ta byla vždy stejná. Nejlépe ze všech testovaných destiček vyšla skupina B se zaoblením řezné hrany 20 µm a destičky skupiny E se zaoblením 30 µm, neboť byly odebrány z běžné výroby a nesplňovaly toleranci  $\pm 5 \mu\text{m}$  a svým skutečným zaoblením tak odpovídaly spíše destičkám se zaoblením 20 µm. Testy jednoznačně ukázaly, že zaoblení 30 µm, které bylo u těchto destiček do té doby používáno, není nejlepší volbou a došlo k jeho přehodnocení.

## 5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Volba řezných podmínek pro daný nástroj hraje při procesu obrábění velmi důležitou roli. Optimálními řeznými podmínkami lze odebrat větší objem materiálu za kratší čas a tím dochází ke snížení nákladů na obrábění, větší produktivitě práce a především efektivnějšímu využití daného nástroje.

### 5.1 Řezné podmínky

Pro porovnání výkonnosti frézovací destičky XOEX090808FR-M06 při obrábění slitiny titanu Ti-6Al-4V v závislosti na řezných podmínkách byly použity minimální a maximální doporučené hodnoty řezných parametrů a hodnoty zvýšené - testované, za kterých byly prováděny zkoušky vlivu zaoblení řezné hrany.

Tab. 5.1 Řezné podmínky

Řezné parametry	Jednotky	Hodnoty řezných parametrů:		
		minimální	maximální	zvýšené
Počet zubů $z$	[-]	1		
Posuv na zub $f_z$	[mm.min <sup>-1</sup> ]	0,04	0,08	0,13
Řezná rychlost $v_c$	[m.min <sup>-1</sup> ]	84,5	71,5	60
Šířka záběru ostří $a_p$	[mm]	2		
Šířka řezu $a_e$	[mm]	5		

Poznámka: Dle poměru mezi šířkou záběru a průměrem držáku, bylo nutné jednotlivé řezné rychlosti, kromě rychlosti testované, vynásobit tzv. rychlostním koeficientem 1,3.

### 5.2 Produktivita testované destičky

Výpočet otáček nástroje:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \Rightarrow n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} \quad [\text{min}^{-1}] \quad (5.1)$$

- minimální  $n_{\min}$   $n_{\min} = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{84,5 \cdot 1000}{\pi \cdot 20} = 1344,86 \text{ min}^{-1}$
- maximální  $n_{\max}$   $n_{\max} = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{71,5 \cdot 1000}{\pi \cdot 20} = 1137,96 \text{ min}^{-1}$
- zvýšené  $n_{zv}$   $n_{zv} = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{60 \cdot 1000}{\pi \cdot 20} = 954,93 \text{ min}^{-1}$

Výpočet minutového posuvu:

$$f_{\min} = f_z \cdot z \cdot n \quad [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (5.2)$$

- minimální  $f_{\min_{\min}} \quad f_{\min_{\min}} = f_{z_{\min}} \cdot z \cdot n_{\min} = 0,04 \cdot 1 \cdot 1345 = 53,8 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
- maximální  $f_{\min_{\max}} \quad f_{\min_{\max}} = f_{z_{\max}} \cdot z \cdot n_{\max} = 0,08 \cdot 1 \cdot 1138 = 91,04 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
- zvýšené  $f_{\min_{zv}} \quad f_{\min_{zv}} = f_{z_{zv}} \cdot z \cdot n_{zv} = 0,13 \cdot 1 \cdot 955 = 124,15 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

Výpočet objemu odebraného materiálu za minut:

$$Q = a_p \cdot a_e \cdot f_{\min} \quad [\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}] \quad (5.3)$$

- minimální  $Q_{\min} \quad Q_{\min} = a_p \cdot a_e \cdot f_{\min_{\min}} = 2 \cdot 5 \cdot 53,8 = 538 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$
- maximální  $Q_{\max} \quad Q_{\max} = a_p \cdot a_e \cdot f_{\min_{\max}} = 2 \cdot 5 \cdot 91,04 = 910,4 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$
- zvýšené  $Q_{zv} \quad Q_{zv} = a_p \cdot a_e \cdot f_{\min_{zv}} = 2 \cdot 5 \cdot 124,15 = 1241,5 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$

Výpočet objemu odebraného materiálu za  $T = 30,49 \text{ min}$ :

$$Q_{30,49} = Q \cdot T \quad [\text{mm}^3] \quad (5.4)$$

- minimální  $Q_{30_{\min}} \quad Q_{30,49_{\min}} = Q_{\min} \cdot T = 538 \cdot 30,49 = 17775,67 \text{ mm}^3 = 17,76 \text{ cm}^3$
- maximální  $Q_{30_{\max}} \quad Q_{30,49_{\max}} = Q_{\max} \cdot T = 910,4 \cdot 30,49 = 27758,10 \text{ mm}^3 = 27,76 \text{ cm}^3$
- zvýšené  $Q_{30_{zv}} \quad Q_{30,49_{zv}} = Q_{zv} \cdot T = 1241,5 \cdot 30,49 = 37853,34 \text{ mm}^3 = 37,85 \text{ cm}^3$

Teoretický výpočet trvanlivosti nástroje dle objemu odebraného  $Q_{30_{zv}} = 37,85 \text{ cm}^3$ :

$$Q_{30,49} = Q \cdot T \Rightarrow T = \frac{Q_{30,49}}{Q} \quad [\text{min}]$$

- minimální  $T_{\min} \quad T_{\min} = \frac{Q_{30,49_{zv}}}{Q_{\min}} = \frac{37853,34}{538} = 70,36 \text{ min}$
- maximální  $T_{\max} \quad T_{\max} = \frac{Q_{30,49_{zv}}}{Q_{\max}} = \frac{37853,34}{910,4} = 41,58 \text{ min}$

## Závěr

Z výpočtů vyplývá, že při použití navýšených řezných podmínek, než jsou maximální doporučené hodnoty daného nástroje, odebereme větší objem materiálu za jednotku času. Pokud srovnáme tento výpočet s výpočet pro minimální doporučené řezné podmínky a budeme uvažovat stejnou dobu obrábění, produktivita u minimálních řezných

podmínek nám klesne o 131 %. V opačném případě při použití maximálních doporučených řezných podmínek se nám objem odebraného materiálu zmenší o 36 %. Z tohoto teoretického výpočtu vyplývá, že by navýšené – testované řezné podmínky byly hospodárnější. Je ovšem nezbytné ověřit zmiňované praktickým testem.

### **Závěr**

Díky neustále se zvyšujícím nárokům na vyráběné součásti tak superslitiny v dnešní době nabývají na stále větší významnosti. Jsou využívány především pro jejich vysokou pevnost a nízkou hmotnost. Se stoupajícími pevnostními vlastnostmi používaných materiálů tak musí jít ruku v ruce také vývoj řezných nástrojů. Jelikož se v dnešní době nepředpokládá příchod zcela nového materiálu na trh, výzkum se zabývá přizpůsobováním již stávajících materiálů pro uspokojení nových požadavků, které jsou na ně kladeny. Ukazuje se tak, že minimální úpravy v chemickém složení řezného materiálu, nebo například geometrii nástroje, mohou být pro obrábění dané slitiny daleko větším přínosem, než finančně i časově nákladný vývoj nového nástrojového materiálu.

Společnost Seco Tools AB pro vývoj a úpravy řezných nástrojů vymezuje opravdu velký prostor. Mezi časově i finančně nenáročnými úpravami nástroje patří například změna velikosti zaoblení řezné hrany. Právě její vliv na lepší obrábění jedné z nejpoužívanější slitiny titanu Ti-6Al-4V byl zkoumán v praktické části práce.

Provedené testy prokazují, že tato nepatrná úprava nástroje v praxi přináší velmi výrazné pozitivní výsledky ohledně opotřebení a s tím spojené trvanlivosti, které mají vliv na samotnou životnost daného nástroje. Získané poznatky jsou nyní ve společnosti Seco Tools AB aplikovány při výrobě těchto testovaných VBD.

### **Poděkování**

Děkuji tímto doc. Ing. Vladimíru Vrbovi, CSc. a firmě Seco Tools AB, jmenovitě potom Ing. Martinu Sehnalovi za cenné připomínky a rady při vypracovávání bakalářské práce a Thomasu Norströmovi za praktické uskutečnění spolupráce s touto firmou. V neposlední řadě také děkuji mé mamince za její podporu po celou dobu mého studia.



**Použitá literatura:**

- [1] DONACHIE, M.J., DONACHIE S.J. Superalloys: A Technical Guide. Second Edition. Metals park, Ohio: ASM, cop. 1984. 412 p. ISBN 0-87170-170-7
- [2] EZUGWU, E.O. High Speed Machining of Aero-Engine Alloys. ABCM. Vol.26. 2004. pp. 26-31. ISSN 1678-5878.
- [3] LEYENS, C., PETERS, M. Titanium and Titanium alloys. WILEY-VCH, 2002. 294 p. ISBN 3-527-30534-3
- [4] PTÁČEK, Luděk a kolektiv. Nauka o materiálu II. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. 396 s. ISBN: 80-7204-248-3.
- [5] CARPENTER. Technical data sheet – Titanium Alloy Ti 6Al-4V. [online]. Dostupné na World Wide Web:  
<<http://cartech.ides.com/datasheet.aspx?i=101&E=269&FMT=PRINT>>
- [6] CAMPBELL, F.C. Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials 1.vyd. Elsevier Ltd., 2006. 617 p. ISBN 1-85-617-7495-6.
- [7] ABELE, E., FRÖHLICH, B. High Speed Milling of Titanium Alloys. APEM Journal. Vol.3. 2008. pp. 131 - 140. ISSN 1854-6250.
- [8] WATSON, D., BAYHA, T. Titanium Takes Off. Cutting Tool Engineering. Vol.3. 2007 pp. 36-41. ISSN 0011-4189.
- [9] TURNAD, L.G, MOHD, A.L. Improved Tool Life in End Milling Ti-6Al-4V Through Workpiece Preheating. European Journal of Scientific Research. Vol. 27. 2009. pp. 384-391. ISSN 1450-216X.
- [10] PRAMET. Frézování: katalog 2006. PRAMET TOOLS, s. r. o., 2006. 256 s.
- [11] MRKVICA, I., MORAVEC, V.: Úpravy břitů a povrchů rezných nástrojů. [online]. [cit. 28. 4. 2008]. Dostupné na World Wide Web:  
<<http://www.mmspektrum.com/clanek/upravy-britu-a-povrchu-reznych-nastroju>>.
- [12] SEHNAL Martin. Povlakované slinuté karbidy a jejich efektivní využití. Diplomová práce v oboru „Strojírenská technologie - obrábění“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2006. 89 s.
- [13] KOUNTANYA, R., ENDRES, W.J. The Effects of Corner Radius and Edge Radius on Tool Flank Wear. ASME Journal of Manufacturing Processes. Vol.8. 2002 pp. 89-96. ISSN 1526-6125
- [14] FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1.vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
- [15] SECO TOOLS. Machining navigator – milling: katalog 2008. SECO TOOLS AB, 2008. 572 p.